

桢楠种源幼苗细根形态和生物量研究

李晓清*, 代仕高, 龙汉利, 张炜, 辜云杰

(四川省林业科学研究院, 成都 610081)

摘要: 为了解桢楠(*Phoebe zhennan*)不同种源细根形态和生物量分配的差异, 采用全根调查的方法, 对桢楠自然分布区 13 个种源 2.5 年生幼苗的细根形态和生物量进行了研究。结果表明, 桢楠种源间各级细根的平均直径、总根长和表面积差异显著, 在种源内细根的平均直径随根序的增加而增加, 但根序间总根长和表面积差异规律不明显。根序生物量分配随根序增加而增加, 1~4 级根生物量分配分别为 6.33%、14.47%、25.03%和 54.17%。通过综合评价, 以 HT、LF、ES 和 WC 种源的根系最优, 具有较高的生长潜力。

关键词: 桢楠; 根序; 细根形态; 细根生物量

doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.02.012

Fine Root Morphology and Biomass of *Phoebe zhennan* Provenance Seedlings

LI Xiao-qing*, DAI Shi-gao, LONG Han-li, ZHANG Wei, GU Yun-jie

(Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China)

Abstract: In order to understand the differences of fine root morphology and biomass allocation among different provenances of *Phoebe zhennan*, the fine root morphology and biomass of 2.5-year-old seedlings of 13 provenances in natural distribution areas were studied by root investigation method. The results showed that the average diameter, total root length and surface area of fine roots among *P. zhennan* provenances were different significantly, with root order increased the average diameter of fine roots enlarged within provenances, but the difference of total root length and surface area between root orders was not obvious. Allocation of biomass enhanced as root order increased, which from 1- to 4- grade-root accounting for 6.33%, 14.47%, 25.03% and 54.17%, respectively. Through comprehensive evaluation, the root system of HT, LF, ES and WC provenances were optimized with high growth potential.

Key words: *Phoebe zhennan*; Root order; Fine root; Morphology; Biomass

森林生态系统结构非常复杂, 许多生态因子影响着细根分布结构以及细根生物量的分布。细根(直径 ≤ 2 mm)通过周转过程向土壤输送有机质, 是植物吸收水分和养分的重要器官。植物细根形态反映细根的功能, 决定植物获取土壤有效

资源策略, 而土壤养分和水分空间异质性又影响植物细根的形态特征。树木根系具有复杂的分枝系统, 在分枝系统中的位置决定其生理生态功能。不同根序等级的细根由于发育顺序不同, 其直径、根长、比根长差异较大, 在细根养分吸收、运输等

收稿日期: 2015-05-07 接受日期: 2015-07-01

基金项目: 国家林业局林业公益性行业科研专项(201104109)资助

This work was supported by the Special Projects for Forestry Public Welfare Science Research (Grant No. 201104109).

作者简介: 李晓清(1969~), 男, 博士, 研究员, 主要从事森林培育研究。

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: (lixq_forestry@sina.com)

过程中所起的作用不同^[1]。细根生物量虽然仅占植物体总生物量的5%左右,但由于细根生长和周转迅速,其生长量可占森林初级生产力的50%~75%^[2-3]。细根生物量及其时空分布受众多因素的影响。由于细根生物量是林分生物量的重要组成部分,国内外学者对根系的空间分布以及影响因素进行了大量的研究^[4-6]。土壤养分、水分等的空间异质性和对林木的生长有很大的影响,导致植物根系在土壤中的空间分布具有很大的差异。因此考虑到根系分布空间异质性,本文采用全根调查方法,以期更真实的反映林木根系的特征。

桢楠(*Phoebe zhennan*), 俗称楠木, 为樟科(Lauraceae)常绿大乔木, 是国家二级重点保护树种, 是我国特有的珍贵用材树种, 主要分布于四川、重庆、贵州、湖南和湖北省海拔1500 m以下的阔叶林中, 其干形通直, 木材材质致密坚韧, 耐腐而不易反翘开裂, 加工容易, 剖面光滑, 纹理美观, 主要用于上等建筑、家具、造船及工艺雕刻等。目前关于桢楠的研究主要集中在苗木培育、木材材性、栽培技术等方面, 但对于桢楠种源研究, 尤其是幼苗细根形态和生物量研究还未见报道。本研究按桢楠不同种源进行采种育苗, 分析不同种源幼苗的细根形态和生物量分配差异, 为评价桢楠不同种源差异奠定基础, 也为桢楠良种

选育和种质资源收集提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验地点

试验地位于四川省泸州市泸县玉蟾(105.3833° E, 29.1500° N), 海拔520 m, 属亚热带湿润季风气候, 雨量充沛, 气候温和, 光照一般, 无霜期长, 雨热同季, 冬季春旱, 盛夏炎热。年平均温度17.8℃, 年最高温度39.7℃, 年最低温度-2.4℃, 年均日照1398 h, 年降雨量1065 mm。土壤为山地黄壤, pH值4.5~6.0, 肥力中等, 排水良好。

1.2 材料

对国内桢楠(*Phoebe zhennan*)主要分布区(四川、重庆、贵州、湖南、湖北省)开展调查, 选择不同种源的优良单株, 分单株采集种子、育苗(表1)。每株优树种子分为3份, 采用随机区组试验设计, 3次重复。苗木培育统一采用直播方式, 容器规格为15 cm×20 cm, 在相同基质和管理条件下, 2012年3月播种, 2014年10月调查取样, 苗木培育时间2.5年。每个种源选取不低于3株苗木, 用枝剪去掉地上部分, 在盛水的盆中小心去掉泥土, 尽量保持根系的完整, 洗净晾干, 带回实验室。

表1 桢楠种源的地理信息

Table 1 Geographical information of *Phoebe zhennan* provenances

编号 No.	种源 Provenance	地点 Location	优良单株数 Number of superior individuals	北纬(°) Northern latitude	东经(°) East longitude	海拔(m) Altitude
1	CZ	崇州 Congzhou	4	30.6513	103.6637	820
2	DJY	都江堰 Dujiangyan	22	30.7553	103.4166	760
3	CD	成都 Chengdu	4	30.6589	104.0833	500
4	LS	乐山 Leshan	3	29.9510	103.6638	550
5	YA	雅安 Ya'an	3	29.7922	102.8447	819
6	TL	铜梁 Tongliang	3	29.8183	106.0392	360
7	MT	湄潭 Meitan	2	27.6105	107.3697	770
8	WC	务川 Wuchuan	3	28.3713	107.8668	740
9	BJ	保靖 Baojing	4	28.5827	109.6411	488
10	SZ	桑植 Sangzhi	7	29.5729	110.0683	380
11	HT	会同 Huitong	3	29.2659	109.3643	630
12	LF	来凤 Laifeng	5	29.5007	109.1381	646
13	ES	恩施 Enshi	3	30.0167	109.0593	810

1.3 方法

细根的分级

细根根序的划分依据为细根

的着生点, 位于根轴最远端没有分支的根为1级根, 1级根着生于2级根, 2级根着生于3级根上, 以此类

推。着生于高级根上的没有分支的根也分为 1 级根。分级完成后,将不同根序的根分别装入对应器皿中,做好标记,在最短时间内进行形态扫描及生物量测定。

形态扫描 用Epson数字化扫描仪(Expression 10000XL1.0)对试验样品的各级根进行扫描,扫描根系图像采用WinRHIZO (Pro2004)软件进行形态特征分析,测量各级根直径、总长度、总表面积。

生物量测定 将已扫描的细根置于70℃下烘干48 h至恒重,然后用电子天平(± 0.0001)称量干重并记录。

1.4 数据处理

根据观测,只有少数种源分支到5级,本研究统一按1~4级根进行统计分析。所有数据处理和分析采用Excel和SPSS 19.0软件,以 $P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示差异极显著。

2 结果和分析

2.1 细根的直径

细根直径是根系重要的结构特征,其粗细反映不同的生理功能。由表2可知,不同种源细根的平均直径均随根序增加而增大($P < 0.01$)。其中,1级根的直径最小(0.36~0.89 mm),4级根的直接最大(1.15~2.20 mm)。不同种源间各级细根的平均直径差异显著($P < 0.05$)。其中,种源DJY、TL、MT、YA和WC的1级根直径较大(> 0.70 mm)。

2.2 细根的总根长

根系长度是植物抗旱能力的重要指标,总根长大小直接关系植物对营养的吸收和对于干旱环境的适应能力^[7]。细根根长对于细根有效获取养分和水分具有直接影响,单根根长是表征细根形态参数的最基本指标之一,并随根序上升而增加,但同一根序内细根根长没有显著变化^[8]。由表3可以看出,不同种源苗木总体表现出1级根总根长最小,其次是3级根、4级根,2级根的最大。不同种源间同一级根

表2 细根的平均直径

Table 2 Mean diameter of fine roots

编号 No.	根序 Order			
	1	2	3	4
1	0.36±0.01c	0.63±0.04c	0.80±0.09c	1.28±1.32bc
2	0.72±0.02ab	0.79±0.06b	1.20±1.02ab	1.43±1.35bc
3	0.46±0.03bc	0.55±0.05c	0.73±0.08c	1.30±1.25bc
4	0.41±0.02c	0.68±0.06c	0.69±0.07c	1.52±1.43b
5	0.70±0.04ab	0.73±0.06bc	1.11±1.01b	1.72±1.89b
6	0.89±0.03a	1.05±0.08a	1.54±1.12a	2.11±2.02a
7	0.79±0.03a	0.81±0.07ab	1.47±1.20a	2.14±2.19a
8	0.74±0.03ab	0.93±0.08a	1.03±1.02bc	2.20±2.08a
9	0.52±0.02b	0.86±0.06ab	1.34±1.23a	1.51±1.72b
10	0.57±0.03b	0.78±0.07b	0.93±1.05bc	1.36±1.53bc
11	0.54±0.02b	0.90±0.06a	1.19±1.17ab	1.59±1.48b
12	0.47±0.02bc	0.89±0.08ab	1.29±1.32a	1.44±1.36bc
13	0.55±0.03b	0.81±0.08ab	1.10±0.09b	1.15±1.27c

同列数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

Data followed different letters indicate significant differences at 0.05 level.

The same is following Tables.

表3 细根的总根长

Table 3 Total length of fine roots

编号 No.	根序 Order			
	1	2	3	4
1	56.25±4.82c	152.89±12.96b	165.53±17.02a	110.75±11.84a
2	73.91±7.13b	150.81±17.34b	120.63±10.25bc	102.08±10.37ab
3	67.68±7.21bc	128.05±15.62c	75.86±8.57d	71.47±8.90c
4	90.58±8.59a	166.58±17.83ab	179.14±19.63a	82.31±8.36bc
5	56.68±5.68c	127.86±11.09c	111.68±12.09bc	63.97±7.89d
6	83.61±8.19ab	108.85±11.36d	105.41±11.42c	99.69±8.67ab
7	81.10±8.93ab	141.50±14.92bc	114.64±10.99bc	62.32±7.83d
8	86.82±7.85a	181.89±18.74a	109.86±11.14bc	100.68±11.35ab
9	77.54±7.26b	129.36±14.89c	80.75±9.02d	60.56±7.83d
10	70.36±6.31bc	127.66±13.59c	96.59±9.49cd	92.74±9.54b
11	89.72±9.03a	148.07±15.29b	133.81±12.55b	80.69±8.77bc
12	71.25±6.72bc	135.64±15.33bc	122.64±12.20b	88.01±9.35b
13	85.57±8.64a	146.61±15.72b	176.86±18.57a	117.78±12.64a

的总根长差异较大($P < 0.05$),种源CZ、DJY、LS、MT、WC和ES的总根长较大。

2.3 细根的总表面积

根系表面积直接影响着植物对水分养分的吸收利用,是保证植物健康生长的重要因素之一。从表4可见,相同根序不同种源间的根系表面积差异显著($P < 0.05$),1级根以种源TL、MT、WC的总表面积最大,达53 cm²以上,而种源CZ、CD、SZ的1级根总表面积仅为6~15 cm²,相差3~8倍。但同一种源不同根序间表现的规律不一致。

2.4 生物量分配格局

从图1可知, 在桢楠幼苗根序的生物量分配中, 1级根生物量所占比例最低, 种源TL的仅为3.16%, 最高为种源BJ(10.53%), 其余种源1级根所占比例约为5%。2级根生物量所占比例为8%~22%, 3级根为11%~35%, 4级根最大, 为35%~73%。所有桢楠种源幼苗根序生物量分配表现为1级根(6.33%)>2级根(14.47%)>3级根(25.03%)>4级根(54.17%)。

表 4 细根的总表面积

Table 4 Total surface area of fine roots

编号 No.	根序 Order			
	1	2	3	4
1	6.54±1.29e	32.66±3.45b	42.40±4.18a	39.74±4.29ab
2	34.58±3.58bc	34.14±3.81b	30.28±3.87bc	39.07±3.84ab
3	13.74±1.55d	19.70±2.02c	16.52±1.94d	26.03±2.53c
4	20.26±2.36c	22.45±2.76c	38.95±4.14ab	41.72±4.02ab
5	17.04±1.93c	27.19±2.91bc	37.07±3.29ab	30.69±3.73b
6	53.65±6.28a	29.39±2.05bc	29.77±3.62bc	48.38±4.85a
7	54.43±5.69a	59.88±6.04a	28.71±3.71bc	21.21±2.70c
8	56.68±5.91a	51.79±5.29a	32.26±3.22b	32.62±3.44b
9	33.79±3.75bc	20.63±2.73c	22.39±2.54c	30.43±3.71b
10	15.13±1.37cd	19.62±2.04c	24.18±2.81c	38.70±4.06ab
11	35.00±3.80bc	48.33±5.82a	24.31±2.05c	38.84±3.34ab
12	34.31±3.25bc	19.98±2.16c	33.54±3.77b	42.99±4.11ab
13	43.48±5.19b	39.10±3.99ab	46.33±4.36a	43.36±4.83ab

2.5 综合评价

通过评价植物苗期生长性状进而筛选优良种质资源是林木育种措施之一。植物的生长特性是由遗传因子和环境共同控制的复杂数量性状, 分析指标分为地上和地下部分, 地下部分主要是分析根的各项指标, 因为用任何单一的指标都很难确切地评

定植物的优劣, 正是由于这些指标对生理生化过程的综合作用才形成了植物的生长表现。因此, 应对各种指标进行综合分析, 本文选取16个根系指标, 应用Fuzzy模糊数学中隶属函数值法对桢楠幼苗进行综合评价。因为根系指标与抗旱性呈正相关: $X(\mu)=(X-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$, 式中 X 为平均值, X_{min} 为最小值, X_{max} 为最大值。将每个种源各指标的隶属函数值累加起来, 数值越大, 根系越发达。表5表明, HT、LF、ES和WC种源的根系综合评价价值最高, 说明这些种源根系发达。

3 讨论

根在发挥植物功能以及生态系统碳和养分循环过程中起着重要作用, 细根对森林生产力具有决定性影响。细根的形态和生理功能是紧密相连的。生长在根系末端的1级根的木质化程度较低, 最容易死亡, 低级根的形态、结构决定其功能是吸收养分和水, 而高级根的木质化程度较高, 寿命较长, 其形态、结构决定其功能是运输和贮存养分^[9-10]。直径是树木根系最重要的结构和形态特征之一, 以往根系生态学研究大都将直径<2 mm 定为细根。1级根直径最细, 直径随根序的增加而增加。同一树种同一级根直径发生变异, 其与生理功能的差异相关。研究细根形态结构的异质性是认识细根动态、了解细根功能和准确估计细根寿命的前提。细根直径大小和根序对细根寿命和周转估计具有重

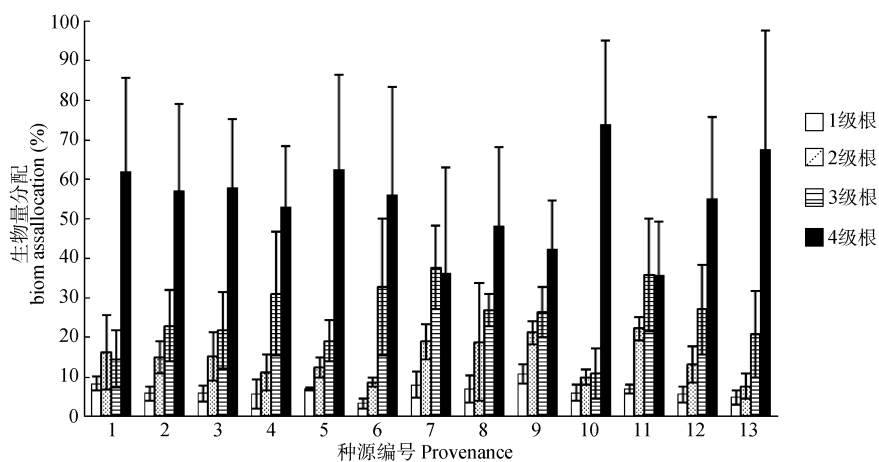


图1 根序生物量分配

Fig. 1 Biomass allocation of fine roots in different root order

表5 桢楠不同种源根系综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of fine roots in *Phoebe zhennan* provenances

	根序 Order	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
直径 Diameter	1	0.00	0.68	0.19	0.09	0.64	1.00	0.81	0.72	0.30	0.40	0.34	0.21	0.36
	2	0.16	0.48	0.00	0.26	0.36	1.00	0.52	0.76	0.62	0.46	0.70	0.68	0.52
	3	0.13	0.60	0.05	0.00	0.49	1.00	0.92	0.40	0.76	0.28	0.59	0.71	0.48
	4	0.12	0.27	0.14	0.35	0.54	0.91	0.94	1.00	0.34	0.20	0.42	0.28	0.00
总根长 Total length	1	0.00	0.51	0.33	1.00	0.01	0.80	0.72	0.89	0.62	0.41	0.97	0.44	0.85
	2	0.60	0.57	0.26	0.79	0.26	0.00	0.45	1.00	0.28	0.26	0.54	0.37	0.52
	3	0.87	0.43	0.00	1.00	0.35	0.29	0.38	0.33	0.05	0.20	0.56	0.45	0.98
	4	0.88	0.73	0.19	0.38	0.06	0.68	0.03	0.70	0.00	0.56	0.35	0.48	1.00
总表面积 Total surface area	1	0.00	0.56	0.14	0.27	0.21	0.94	0.96	1.00	0.54	0.17	0.57	0.55	0.74
	2	0.32	0.36	0.00	0.07	0.19	0.24	1.00	0.80	0.03	0.00	0.71	0.01	0.48
	3	0.87	0.46	0.00	0.75	0.69	0.44	0.41	0.53	0.20	0.26	0.26	0.57	1.00
	4	0.68	0.66	0.18	0.75	0.35	1.00	0.00	0.42	0.34	0.64	0.65	0.80	0.82
生物量 Biomass	1	1.00	0.33	0.50	0.50	0.50	0.00	0.33	0.33	0.50	0.50	0.17	0.33	0.33
	2	1.00	0.50	0.80	0.40	0.30	0.00	0.40	0.60	0.40	0.20	0.50	0.40	0.00
	3	0.22	0.39	0.52	1.00	0.26	0.87	0.57	0.39	0.17	0.00	0.43	0.61	0.48
	4	0.87	0.53	0.73	0.67	0.64	0.58	0.04	0.27	0.05	1.00	0.00	0.55	0.93
总和 Sum		8.73	10.06	7.04	12.30	10.85	15.76	15.47	18.14	14.21	15.54	18.76	19.43	22.48

要的影响,研究不同根序间的直径变异对认识细根直径与根序的关系具有重要意义。分支是根系最基导致细根结构和功能的可塑性,同一根序的细根直径可能会有较大的差异^[11]。树木细根在不同水平上的异质性表明,控制细根直径的因子是不同的,而通过根序研究细根的生理生态问题可以降低这种异质性^[12]。有研究表明,细根形态除了受树种本身的遗传因子控制外,主要受土壤资源的有效影响^[13-14]。土壤资源的有效性对单个细根直径的影响远远大于对平均直径的影响,根系往往通过个体直径的变化来适应土壤的异质性^[15]。土壤水分生态环境影响着林木根系的生长分布,而根系又可以改变土壤的水分分布。目前,林木植物根系生长及土壤水分的分布在很大程度上受所处生态环境的影响^[16],人工经营措施同样会影响细根^[7,17-19]。因此,在细根寿命与周转研究过程中,必须同时考虑直径和根序对细根的寿命估计的影响。

直径级分类法忽视了细根内部生理功能上的差异,也无法系统比较种间差异。而I级根不论直径大小可能都是具有吸收功能的根,用根序来划分细根内部的异质性有助于更好地认识根系的功能。遗传和进化可能也影响了各树种间细根直径的差异。可能正是这些古老树种导致亚热带和热带树种各根序平均直径增加,树种间直径变异增大^[12]。桢楠

本的结构特征,分支的顺序构成根序,代表根系不同发育阶段。由于土壤养分和水分的空间异质性会1级根的平均直径为0.59 mm,与亚热带树种阴香(*Cinnamomum burmannii*)、火力楠(*Michelia macclurei*)相近,进一步证明了遗传和进化可能也影响了各树种间细根直径的差异。但由于本研究未涉及树木不同年龄的细根直径变异,是否会随着年龄的变化而改变还有待于研究。

桢楠细根总根长以2级根最长,其次是3级和4级,1级根最小,与Pregitzer^[8]研究结果相似,但不完全一致。根系表面积是根系与土壤间进行营养交换的界面,与水分吸收密切相关,是研究水分吸收或养分吸收的重要参数之一。在同一种源内,桢楠幼苗不同根级间表现的规律不一致,但种源间1级根根系表面积相差3~8倍。根系表面积是由根系直径和根长2个因子共同决定的,是直径的平方与长度的乘积,因此具有放大的特征。影响这2个因子的主要是遗传因子和环境因子(土壤养分和水分),种源间1级根表面积差异可能是由遗传因素引起,为良种选育奠定基础。

细根生物量及其时空分布受众多因素的影响,环境因子(纬度、年平均降水量、海拔高度、温度、土壤含水率)、林分因子(林型、林龄、胸高断面积、密度)、以及演替和择伐等影响细根生物量^[17,20-23]。

桢楠幼苗根序生物量分配中, 1级根生物量所占比例最低(约5%), 随着根级增大而增加。这进一步证明了低级根的形态、结构决定其功能是吸收养分和水, 而高级根的形态、结构决定其功能是运输和贮存养分^[9]。

通过对桢楠不同种源根系各指标的综合评价, 以HT、LF、ES和WC这4个种源根系最优, 表明具有较高的生长潜力。在四川大力推广桢楠可优先考虑这些种源的种子。

参考文献

- [1] YU L Z, DING G Q, SHI J W, et al. Effects of fertilization on fine root diameter, root length and specific root length in *Larix kaempferi* plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2007, 18(5): 957-962.
于立忠, 丁国泉, 史建伟, 等. 施肥对日本落叶松人工林细根直径、根长和比根长的影响 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(5): 957-962.
- [2] WANG C G, HAN S J, ZHOU Y M, et al. Fine root mass and internal nutrient cycling in a broad-leaved Korean pine forest community of the Changbai Mountain [J]. *Sci Silv Sin*, 2012, 48(3): 148-153. doi: 10.11707/j.1001-7488.20120325.
王存国, 韩士杰, 周玉梅, 等. 长白山阔叶红松林群落的细根现存量及养分内循环 [J]. *林业科学*, 2012, 48(3): 148-153. doi: 10.11707/j.1001-7488.20120325.
- [3] LIU G Z, LIU G H, HE X, et al. Anatomical characteristics of roots with different orders and fine root of *Salix gordejewii* [J]. *Acta Bot Boreal-Occid Sin*, 2014, 34(5): 932-937. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.05.0932.
刘冠志, 刘果厚, 贺晓, 等. 黄柳不同级序根的解剖结构及其细根的研究 [J]. *西北植物学报*, 2014, 34(5): 932-937. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.05.0932.
- [4] LI P P, WANG Y P, WANG H T, et al. Fine roots distribution patten of *Populus deltoites* plantations in Yellow River fluvial plain [J]. *J Shandong Agri Univ (Nat Sci)*, 2013, 44(1): 61-65.
李盼盼, 王延平, 王华田, 等. 黄河冲积平原杨树人工林细根空间分布特征 [J]. *山东农业大学学报: 自然科学版*, 2013, 44(1): 61-65.
- [5] ZHANG B, JIN G Z. Effects of selective cutting on the spatial and temporal distribution of fine root biomass in mixed broad-leaved Korean pine forest [J]. *For Res*, 2014, 27(2): 240-245. doi: 10.3969/j.issn.1001-1498.2014.02.016.
张犇, 金光泽. 择伐对阔叶红松林细根生物量及其时空分布的影响 [J]. *林业科学研究*, 2014, 27(2): 240-245. doi: 10.3969/j.issn.1001-1498.2014.02.016.
- [6] WANG Z H, LI R X, HAO J P, et al. Effects of thinning on fine root morphology in Chinese fir plantations [J]. *J NE For Univ*, 2011, 39(6): 13-15. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2011.06.005.
王祖华, 李瑞霞, 郝俊鹏, 等. 间伐对杉木人工林不同根序细根形态的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(6): 13-15. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2011.06.005.
- [7] YE L P, ZHOU Y C, ZHOU W, et al. Response of fine root growth of *Pinus massoniana* middle-aged forest to fertilization [J]. *J CS Univ For Techn*, 2013, 33(2): 50-55.
叶立鹏, 周运超, 周玮, 等. 马尾松人工中龄林细根生长对施肥的响应 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(2): 50-55.
- [8] PREGITZER K S, de FOREST J L, BURTON A J, et al. Fine root architecture of nine North American trees [J]. *Ecol Monogr*, 2002, 72(2): 293-309. doi: 10.1890/0012-9615(2002)072[0293:FRAONN]2.0.CO;2.
- [9] JIA S X, ZHAO Y L, DING G Q, et al. Relationship among fine-root morphology, anatomy, tissue nitrogen concentration and respiration in different branch root orders in *Larix gmelinii* and *Fraxinus mandshurica* [J]. *Chin Bull Bot*, 2010, 45(2): 174-181. doi: 10.3969/j.issn.1674-3466.2010.02.005.
贾淑霞, 赵妍丽, 丁国泉, 等. 落叶松和水曲柳不同根序细根形态结构、组织氮浓度与根呼吸的关系 [J]. *植物学报*, 2010, 45(2): 174-181. doi: 10.3969/j.issn.1674-3466.2010.02.005.
- [10] MEI L, WANG Z Q, CHENG Y H, et al. A review: Factors influencing fine root longevity in forest ecosystems [J]. *Acta Phytocool Sin*, 2004, 28(4): 704-710.
梅莉, 王政权, 程云环, 等. 林木细根寿命及其影响因子研究进展 [J]. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 704-710.
- [11] WANG X R, WANG Z Q, HAN Y Z, et al. Variations of fine root diameter with root order in *Manchurian ash* and *Dahurian larch* plantations [J]. *Acta Phytocool Sin*, 2005, 29(6): 871-877.
王向荣, 王政权, 韩有志, 等. 水曲柳和落叶松不同根序之间细根直径的变异研究 [J]. *植物生态学报*, 2005, 29(6): 871-877.
- [12] CHANG W J, GUO D L. Variation in root diameter among 45 common tree species in temperate, subtropical and tropical forests in China [J]. *J Plant Ecol*, 2008, 32(6): 1248-1257. doi: 10.3773/j.issn.1005-264X.2008.06.005.
常文静, 郭大立. 中国温带、亚热带和热带森林45个常见树种细根直径变异 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1248-1257. doi: 10.3773/j.issn.1005-264X.2008.06.005.
- [13] WANG K, SONG L N, LÜ L Y, et al. Fine root vertical distribution characters of different aged *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations on sandy land [J]. *J NE For Univ*, 2014, 42(3): 1-4. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2014.03.001.
王凯, 宋立宁, 吕林有, 等. 不同林龄沙地樟子松人工林细根垂直分布特征 [J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(3): 1-4. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2014.03.001.

- [14] LIU J L, MEI L, GU J C, et al. Effects of nitrogen fertilization on fine root biomass and morphology of *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii*: A study with in-growth core approach [J]. *Chin J Ecol*, 2009, 28(1): 1–6.
刘金梁, 梅莉, 谷加存, 等. 内生生长法研究施氮肥对水曲柳和落叶松细根生物量和形态的影响 [J]. *生态学杂志*, 2009, 28(1): 1–6.
- [15] WU C, WANG Z Q, FAN Z Q. Significance of senescence study on tree roots and its advances [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, 15(7): 1276–1280.
吴楚, 王政权, 范志强. 树木根系衰老研究的意义与现状 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(7): 1276–1280.
- [16] HU X N, ZHAO Z, YUAN Z F, et al. Relationship between fine root growth of *Robinia pseudoacacia* plantation and the soil moisture in the Loess Plateau [J]. *Sci Silv Sin*, 2010, 46(12): 30–35.
胡小宁, 赵忠, 袁志发, 等. 黄土高原刺槐林细根生长与土壤水分的耦合关系 [J]. *林业科学*, 2010, 46(12): 30–35.
- [17] LI R X, PENG T T, LIU N, et al. Response of carbon storage, fine root biomass and morphology to thinning in *Platycladus orientalis* plantation [J]. *J NE For Univ*, 2013, 41(5): 34–38. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2013.05.008.
李瑞霞, 彭婷婷, 刘娜, 等. 间伐对侧柏人工林碳储量以及细根生物量和形态的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(5): 34–38. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2013.05.008.
- [18] CHEN X L, DIAO J J, MIN J G, et al. Effect of thinning intensity and frequency on fine root morphology and biomass for *Platycladus orientalis* plantation [J]. *J SW For Univ*, 2013, 33(4): 5–11. doi: 10.3969/j.issn.2095-1914.2013.04.002.
陈信力, 刁娇娇, 闵建刚, 等. 间伐强度和次数对侧柏人工林细根形态及生物量的影响 [J]. *西南林业大学学报*, 2013, 33(4): 5–11. doi: 10.3969/j.issn.2095-1914.2013.04.002.
- [19] HUANG F X, FAN C, LI X Q, et al. Effects of fertilization on the fine root growing of *Cinnamomum camphora* seedlings [J]. *J NW For Univ*, 2013, 28(5): 103–108. doi: 10.3969/j.issn.1001-7461.2013.05.20.
黄复兴, 范川, 李晓清, 等. 施肥对盆栽樟樟幼苗细根生长的影响 [J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(5): 103–108. doi: 10.3969/j.issn.1001-7461.2013.05.20.
- [20] LI S Z, TIAN D L, WANG G J, et al. Time-space dynamics of fine root biomass in *Cinnamomum camphora* plantations of Changsha, Hunan [J]. *J CS Univ For Techn*, 2008, 28(6): 51–55. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2008.06.017.
李树战, 田大伦, 王光军, 等. 樟树人工林细根生物量的时空动态 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2008, 28(6): 51–55. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2008.06.017.
- [21] ZHU S Y, ZHOU B, MAO Z J, et al. Space-Time dynamics of fine root biomass of six forests in Maoershan Forest Region [J]. *Sci Sil Sin*, 2006, 42(6): 13–19. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2006.06.003.
朱胜英, 周彪, 毛子军, 等. 帽儿山林区6种林分细根生物量的时空动态 [J]. *林业科学*, 2006, 42(6): 13–19. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2006.06.003.
- [22] YANG L Y, LUO T X, WU S T. Fine root biomass and its depth distribution across the primitive Korean pine and broad-leaved forest and its secondary forests in Changbai Mountain, Northeast China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, 27(9): 3609–3617. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2007.09.008.
杨丽焜, 罗天祥, 吴松涛. 长白山原始阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林及次生林细根生物量与垂直分布特征 [J]. *生态学报*, 2007, 27(9): 3609–3617. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2007.09.008.
- [23] RODRÍGUEZ M V, BERTILLER M B, SAIN C L. Spatial patterns and chemical characteristics of root biomass in ecosystems of the Patagonian Monte disturbed by grazing [J]. *J Arid Environ*, 2007, 70(1): 137–151. doi: 10.1016/j.jaridenv.2006.12.010.